第 38 卷第 3 期
2018 年 2 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.3
Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201612262674
廉丽姝,李宝富,陈忠升,陈亚宁,孙小银.基于 WRF 模式评估土地利用/覆被变化的气候和水文效应.生态学报,2018,38(3):917-925.
Lian L S, Li B F, Chen Z S, Chen Y N, Sun X Y.Quantifying the climatic and hydrological effects of land use/cover change based on Weather Research and Forecasting model.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):917-925.

基于 WRF 模式评估土地利用/覆被变化的气候和水文效应

廉丽姝[1],李宝富[1,2,*],陈忠升[3],陈亚宁[2],孙小银[1]
1 曲阜师范大学地理与旅游学院,日照 276826
2 中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐 830011
3 西华师范大学国土资源学院,南充 637002

摘要:目前针对土地利用/覆被变化(LUCC)导致产汇流等水文过程(直接水文效应)变化的研究较多,而对于 LUCC 导致区域气候变化引起的径流变化(间接水文效应)研究却鲜有报道。采用天气预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF 模式)和弹性系数等方法研究了沂河流域 1990—2010 年 LUCC 产生的间接水文效应。结果表明:WRF 模式对研究区气温具有较好的模拟能力,模拟值与实测值的相关系数较高(0.86—0.97,P<0.001);虽然模式对降水的模拟精度低于气温,但模拟值与实测值之间的相关系数(0.41—0.91)均达到了 P<0.05 显著性水平。近 20 年来,研究区 LUCC 主要是从旱地向建设用地(747.3 km^2)和裸地(132.4km^2)转化的过程。LUCC 引起 2013 年 1 月和 10 月气温增加了 0.2℃,导致 7 月气温减小了 0.2℃,而 4 月气温基本稳定。LUCC 对 1 月、4 月和 10 月降水变化的影响很弱,而对 7 月降水变化影响较大,表现在使其减少了 23.7mm。弹性分析表明,1960—2013 年,流域年均降水和气温变化 1%,将引起年径流量分别变化 2.4% 和 1.8%。1990—2010 年,LUCC 引起 2013 年沂河流域降水和气温变化使得径流量分别改变了 18.4%和 1.7%。

关键词:LUCC;径流;WRF;气候效应;间接水文效应

Quantifying the climatic and hydrological effects of land use/cover change based on Weather Research and Forecasting model

LIAN Lishu [1], LI Baofu [1,2,*], CHEN Zhongsheng [3], CHEN Yaning [2], SUN Xiaoyin [1]
1 *School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao* 276826, *China*
2 *The State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*
3 *College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong* 637002, *China*

Abstract: Currently, most studies have been conducted to determine the impact of land use/cover change (LUCC) on the runoff yield and conflux (Direct Hydrological Effect), while only a few studies have been conducted to determine the runoff change caused by the LUCC-induced regional climate change (Indirect Hydrological Effect). In this study, the Weather Research and Forecasting (WRF) model and elasticity method were used to investigate the indirect hydrological effect caused by LUCC in the Yihe River from 1990 to 2010. The results suggested that the WRF model simulated the temperature of the study area well with high correlation coefficients (0.86—0.97, P<0.001) between the modeled and measured values. Although the simulation precision of model in precipitation was lower than that in temperature, the correlation coefficients ranged from 0.41 to 0.91 with P<0.05 statistically significant level. The main land use in the study area was farmland

基金项目:山东省自然科学基金(BS2014HZ022, ZR2015DL001)
收稿日期:2016-12-26; **网络出版日期**:2017-10-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lenny006@163.com

(including dry and paddy lands), representing approximately 80% of the total area. In the recent 20 years, the land use in the study area transformed gradually from the dry land to the urbanized land (747.3km^2) and bare/sparse vegetation (132.4km^2). The temperature increased by 0.2℃ in January and October and decreased by 0.2℃ in July, which was caused by the LUCC, while the temperature in April was basically stable. The LUCC caused the largest temperature changes, i.e., 0.4—1.3℃ in the mixed forests and water bodies, and the smallest temperature changes, i.e., <0.1℃ in the deciduous broadleaf forests and wetlands. The LUCC showed a weak impact on the precipitation change in January, April, and October, while substantially affecting the precipitation in July with a decrease of 23.7mm. Therefore, the LUCC significantly affected the summer precipitation because of the abundant precipitation in summer, thus changing the moisture fluxes in the study area. The results also indicate that the spatial variations in precipitation due to the LUCC were weakly associated with the underlying surface. Elastic analysis showed that the annual temperature and precipitation changed by 1% during 1960—2013, which can induce runoffs to change by 1.8% and 2.4%, respectively. During 1990—2010, the LUCC-induced changes of precipitation and temperature led runoffs to change by 18.4% and 1.7%, respectively.

Key Words: LUCC; runoff; WRF; climate effect; indirect hydrological effect

土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change,简称 LUCC)是全球变化的重要驱动因素,是迄今人类改变地球系统最重要的方面之一。土地利用类型的变化将影响着地表反照率、地面粗糙度及土壤的热力、水分特性等地表属性,从而对气候以及陆面过程产生极其重要的影响[1-2]。在区域尺度上,植被覆盖变化也能对地表能量平衡和水分平衡产生实质性的影响[3]。因此,LUCC 能够显著影响区域气候变化已经毋庸置疑[4-5]。而且对于区域尺度而言,多数地区气候内部变率的贡献大于外强迫,区域尺度气温变化的机制较全球、半球尺度更为复杂[6]。因此,开展 LUCC 对区域气候变化的影响研究,对明确区域气候变化机理具有重要的科学意义。

LUCC 的区域气候效应研究的主要方法有两大类。一是利用统计学分析法,分析观测数据与再分析资料之间的关系,从而揭示 LUCC 对区域气候的影响[7]。二是运用陆-气耦合模式,结合模拟试验,研究 LUCC 产生的区域气候效应[8-10]。后者因具有良好的物理基础,能够揭示区域气候变化的机制而被广泛应用[11-14]。例如张学珍等[15]利用 WRF(Weather Research and Forecasting)模式,研究了中国中东部耕地扩张对表面气温的影响,结果发现农业扩张对大尺度的区域温度影响较小;王明娜等[5]利用区域模式 WRF 模拟分析了 21 世纪初期 2001—2010 年中国北方半干旱区土地利用变化对地表温度的影响;董思言等[16]利用区域环境集成模拟系统模拟了土地利用/覆被变化对中国不同季节气温的影响;陈海山等[17]模拟了近 20 年中国土地利用变化对区域气候的影响。多数研究表明,由于正、负温度效应在区域平均的过程中相互抵消,使得 LUCC 对区域平均温度变化的影响甚微[5,15],主要表现在同一时间上,LUCC 引起某些土地利用类型的温度增加,某些土地类型的温度却减少;而在同一空间范围内,不同时间尺度也表现出不同的温度变化趋势。可见,LUCC 对区域气候的影响主要限于局地[5,16]。然而,多数研究主要集中在较大的区域(大于 1 ×10^{6}km^2),且空间分辨率多集中在 30km 及以上水平,时间分辨率多介于季节和年尺度之间[16,18],这从很大程度上影响了研究结果的精度。另外,LUCC 对区域气温的影响研究较多,而对局地降水的研究相对较少。

同时,LUCC 对区域气候变化产生的重要影响,也势必会影响水文过程,即为 LUCC 的间接水文效应。但是,多数研究注重探索 LUCC 引起产流、汇流等直接水文过程的变化[19-20],鲜见有探讨 LUCC 对水文过程产生的间接影响的研究。因此,本研究基于卫星观测的研究区 1990 年和 2010 年 LUCC 客观事实,利用 WRF 模式,以鲁南局地(沂河流域)为例,从更高空间(3km)和时间分辨率(月和日尺度)尺度,探析 LUCC 对局地气温和降水变化的影响;并采用弹性系数法,定量评估 LUCC 产生的间接水文效应。研究结论对准确解读 LUCC 对局地气候的影响机制,明确局地水文过程变化机理具有重要的科学指导意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

沂河是淮河流域沂沭泗水系中较大河流,位于 33.5°—36.5°N,117°—119.0°E 之间(图 1),北接海河平原,南邻黄淮平原,为临沂地区的母亲河。沂河源出山东省沂源县,经沂水、沂南、临沂、蒙阴、平邑、郯城等县、市,至江苏省邳县吴楼村入新沂河,抵燕尾港入黄海,流域面积 $1.7×10^4km^2$。

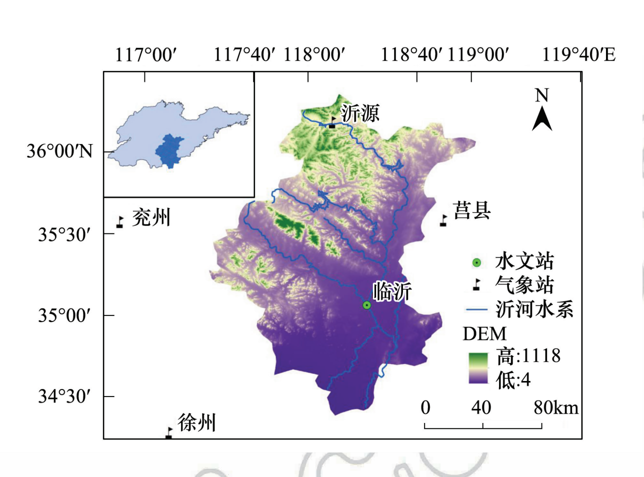


图 1　研究区位置及沂河流域水文和气象站点分布

Fig.1　The study area location map and distribution of meteorological and hydrological stations in Yihe river basin

1.2　试验设计与数据来源

1.2.1　基于 WRF 模式的 LUCC 区域气候效应

采用 WRF 3.7 研究 LUCC 引起的区域气候要素的变化,从而揭示 LUCC 的间接水文效应。由于气温和降水是影响径流变化的主导气候因子,因此本文主要利用 WRF 模式研究 LUCC 引起的区域气温和降水的变化,从而分析其对径流的影响。

本研究主要包括控制试验和敏感性试验。模拟区域的中心经纬度为 35.8°N、118.1°E。试验采用 3 层嵌套方式,水平分辨率分别为 27km(domain1)、9km(domain2)和 3km(domain3)(图 1),对应的格点数分别为 27×36、49×67 和 91×130。考虑到短时间内 LUCC 基本稳定及数据的可获取性,采用 2010 年 LUCC 和 2013 年的驱动场作为控制试验,模拟 2013 年不同月份的气温和降水状况。敏感性试验是将研究区(domain3)2010 年 LUCC 数据改为 1990 年。除了 LUCC 不同之外,所有试验采用了相同的设置和物理参数化方案,所以控制试验与各敏感试验模拟结果之差反映了研究区 LUCC 对区域气候要素的影响。

由于研究区气候季节变化明显,本文设置模拟时间(UTC)为 2013 年 1 月 1 日 00 时—2013 年 2 月 1 日 00 时;2013 年 4 月 1 日 00 时—2013 年 5 月 1 日 00 时;2013 年 7 月 1 日 00 时—2013 年 8 月 1 日 00 时;2013 年 10 月 1 日 00 时—2013 年 11 月 1 日 00 时。这样一方面可以反映 WRF 模式对不同季节天气特征的模拟状况,同时可以展示 LUCC 对不同天气动力状况下的气候要素的影响。另外,参考前人研究成果[15]及敏感性试验,本试验采用的微物理过程方案为 Lin 等的方案,长波辐射方案为 rrtm 方案,短波辐射方案为 Dudhia 方案,近地面层方案为 Monin-Obukhov 方案,陆面过程方案为 Noah 方案,边界层方案为 YSU 方案,积云参数化方案为浅对流 Kain-Fritsch(new Eta)方案。初始场和侧边界使用的是 NCAR 提供的 1°×1°的 NCEP-FNL 再分析数据。

本文假设 LUCC 引起气候要素变化量与实际气温或降水量大小呈正比,那么可以有:

$$\delta = \frac{\Delta X_4}{X_{ms2013}} \cdot X_{2013} \tag{1}$$

式中,δ 是研究区 1990—2010 年 LUCC 引起的 2013 年气温或降水变化量;ΔX_4 为 WRF 模式模拟的 LUCC 引起研究区 2013 年 1、4、7 和 10 月气温或降水的变化量之和;X_{ms2013} 为用 1990 年 LUCC 模拟的 2013 年 1、4、7 和 10 月平均气温或降水量之和;X_{2013} 为研究区 2013 年实测平均气温或降水总量。

本研究的模拟运算采用 WRF 3.7 并行版本,在曙光天阔服务器 1620-G15(32CPU)上完成。控制试验和敏感性试验的外层(domain1 和 domain2)均利用 USGS(美国地质勘测局)10′和 2′土地利用数据,内层(domain3)用中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn) 2010 年 1km×1km 土地利用数据(重分类、重采样和格式转换后)和 1990 年土地利用数据。运用研究区实测气象站数据验证控制试验模拟结果。实测气象资料包括兖州、沂源、莒县和徐州气象站的逐日气温和降水数据。

1.2.2 径流对气候要素变化的弹性系数

在气候变化对水文过程影响研究中，通常采用弹性系数来表征水文要素对气象要素的敏感性。本文采用 Zheng 等[21]提出的弹性计算方法分析 1960—2013 年径流量对降水或气温变化的弹性系数。计算公式如下：

$$\varepsilon = \frac{\bar{X}}{\bar{Q}} \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Q_i - \bar{Q})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \tag{2}$$

式中，X_i为气象要素，Q_i为径流量，ε 为弹性系数，$\bar{X}$ 和 $\bar{Q}$ 分别为气象要素和径流量的多年平均值。ε 的物理意义是指气象要素变化 1%，引起径流的变化率 ε %。

因此，LUCC 引起 2013 年径流变化率（ φ ）为：

$$\varphi = \varepsilon \cdot \delta / X_{2013} \times 100\% \tag{3}$$

1.2.3 Mann-Kendall 单调趋势检验

本文运用 Mann-Kendall 单调趋势检验判定径流和气候要素在某一时间段的变化趋势是否显著。本文取 $P = 0.05$ 的显著性检验水平，若时间序列在此置信水平下存在显著变化趋势，则 $|Z| = 1.96$，Z 为正值，表明时间序列具有上升或增加趋势，Z 为负值，则表示具有下降或减少趋势。

2 结果与分析

2.1 控制试验模拟结果检验

基于控制试验模拟的不同月份逐日气温与实测数据之间的关系可知，WRF 模式能够较好的反映研究区各月气温状况，模拟温度与实测温度之间的相关性均达到了 $P<0.001$ 显著性水平（图 2）。当然，模拟值与实测值之间也具有一定的误差。从月尺度上，WRF 模式对 2013 年 1 月和 7 月模拟的平均气温略低于实测值，误差率分别为 9.1% 和 6.2%；而对 4 月和 10 月模拟的平均气温略高于实测值，误差率分别为 1.8% 和 3.3%。总体来看，WRF 模式对研究区气温模拟结果可靠，可以较好的反映气温的时空变化特征。

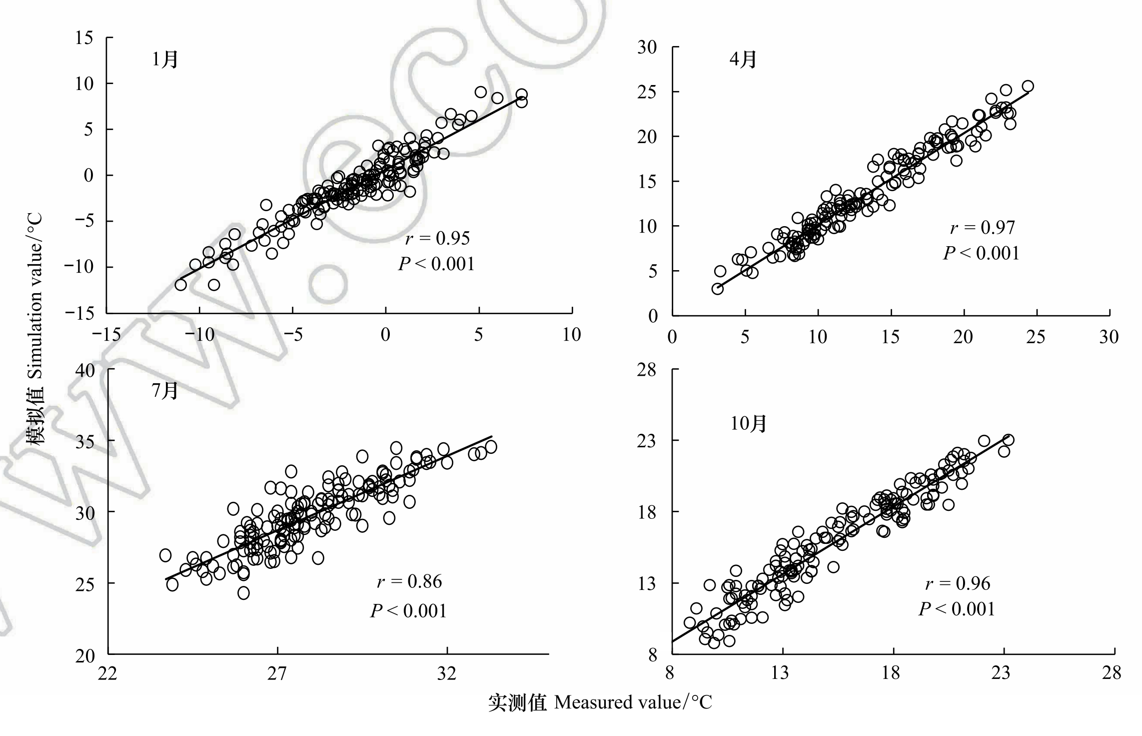


图 2 观测和控制试验模拟的 2013 年 1、4、7 和 10 月份日均温度散点图

Fig.2 Scatter plots of measured and modeled daily temperatures in January, April, July, and October 2013

图 3 展示的是控制试验模拟的不同月份逐日降水与实测数据之间的关系。结果表明，虽然 WRF 模式对

降水的模拟精度低于气温,但模拟降水与实测降水之间的相关性均达到了 $P<0.05$ 显著性水平。从误差率来看,WRF 模式对 2013 年 1 月和 4 月模拟的总降水量略低于实际值,误差率分别为 4.8%和 14.3%;而对 7 月和 10 月模拟的总降水量略高于实测值,误差率分别为 6.7%和 17.1%。可以看出,WRF 模式对研究区降水模拟结果可信。

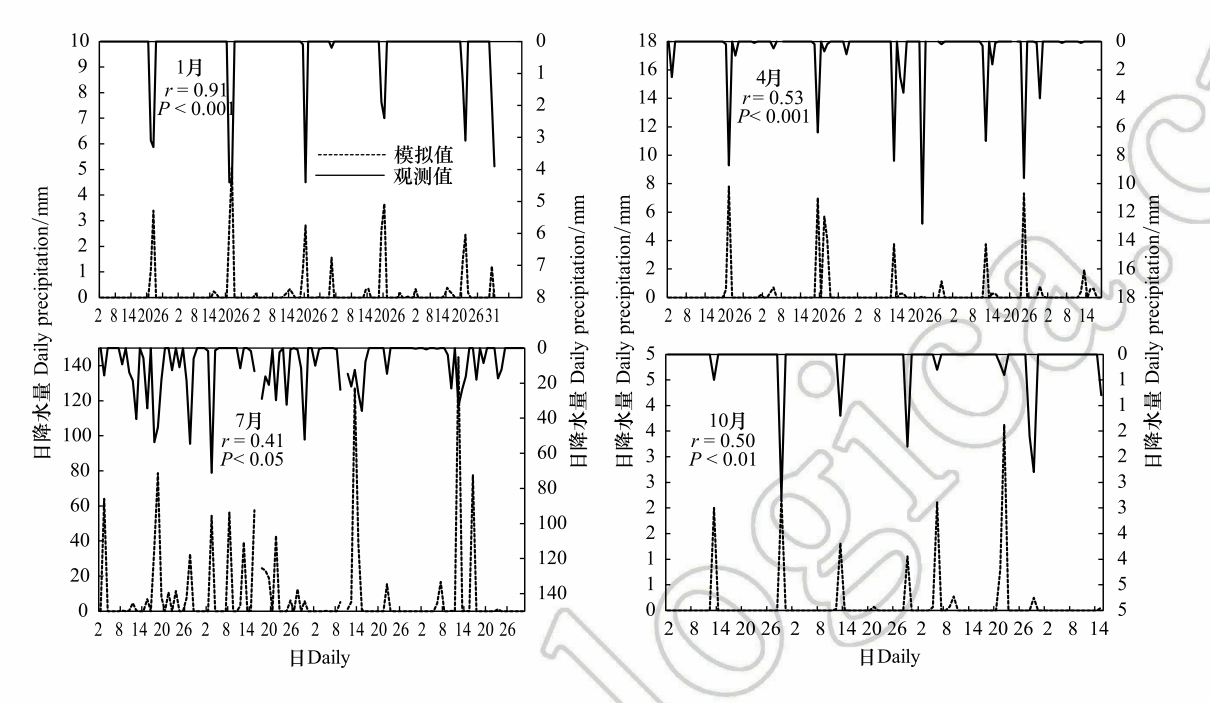


图 3　观测和控制试验模拟的 2013 年 1、4、7 和 10 月份日降水量变化

Fig.3　Measured and modeled (controlled simulations) **precipitation changes in January, April, July, and October 2013**

2.2　土地利用/覆被变化分析

从各土地利用类型所占面积比例来看,1990 和 2010 年,研究区土地利用类型均是以旱地为主,分别占到总面积的 70.3%和 68.6%,其次是水田,分别占总面积的 11.4%和 11.1%,草地和有林地所占面积比例介于 5.4%—7.2%之间,而其他土地利用类型所占面积比例较小(图 4)。

从土地利用类型的变化量来说,1990—2010 年,旱地面积减少量最大,为 1089.8km^2。其次是水田和草地,分别减少了 198.3km^{2}和 62.2km^2。而城市建设用地增加量最大,为 821.8km^2,其次为裸地和水体,分别增加了 207.8km^{2}和 214.2km^2。另外,永久湿地(75.0km^2)和疏林地(55.6km^2)面积略有增加,而其他土地利用类型的面积变化量较小。由此可以看出,近 20 多年来,研究区土地利用类型主要是以旱地向建设用地(747.3 km^2)和裸地(132.4km^2)转化的过程。

2.3　LUCC 导致的气象要素变化

2.3.1　气温变化

图 5 展示的是由控制试验与敏感性试验模拟气温的差值,其结果表明由近 20 年的 LUCC 引起的不同月份气温空间变化。可以看出,由于 LUCC 引起的 1 月和 10 月气温均增加了 0.2℃;而 7 月气温呈现降低态势(0.1℃),另外 4 月气温基本稳定。从各土地利用类型的平均温度来说,1 月仅有城市建设用地平均温度略有降低,其他各土地利用类型平均温度均表现为上升态势,其中混交林气温上升幅度最大,为 0.8℃,其次是水体,温度升高了 0.4℃,而落叶阔叶林和湿地气温上升幅度较小,均小于 0.1℃。4 月仅有旱地温度略有增加,但幅度很小,其他各土地利用类型平均温度均降低,其中混交林温度减少幅度最大,为 1.0℃,其次是水体,温度降低了 0.3℃,而湿地、落叶阔叶林、水田和草地温度降幅较小,小于 0.1℃。7 月所有的土地利用类型温度均呈减少态势,其中仍是混交林和水体降温幅度较大,分别为 1.3℃和 0.3℃,其次是城市建设用地和灌木林地,降温幅度介于 0.2—0.3℃,而湿地气温减少量最小,小于 0.1℃,其他旱地、草地、水田等土地利用类型温度

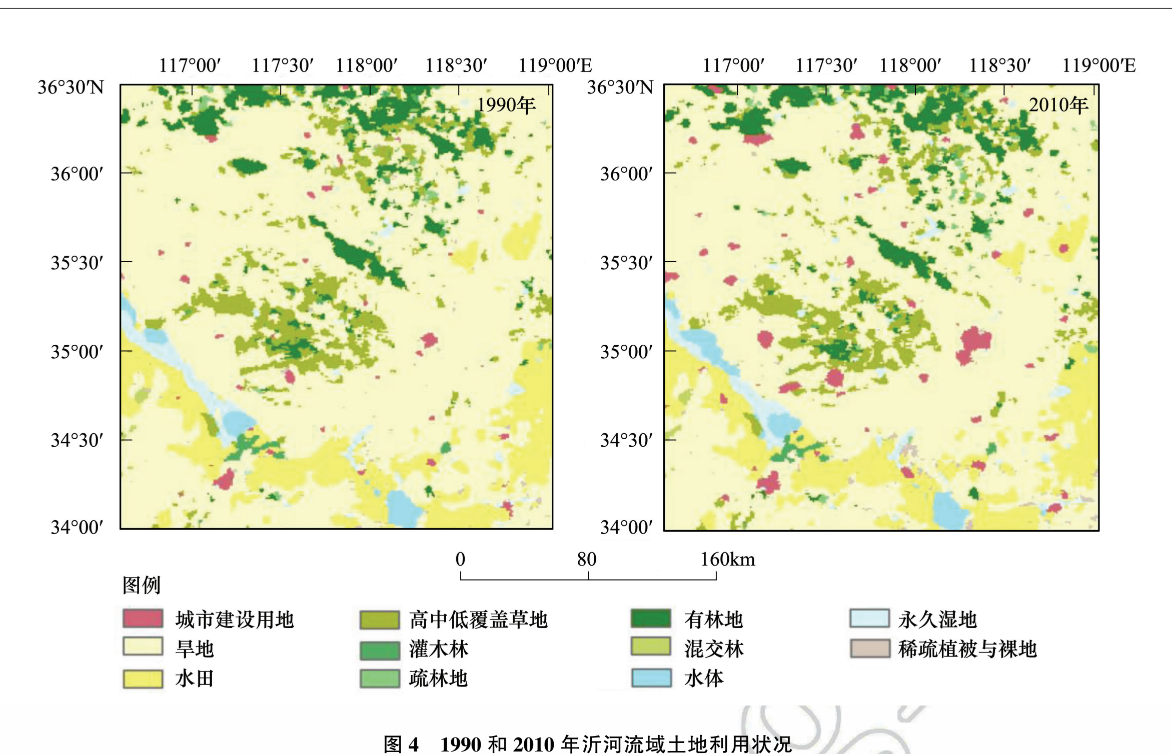


图 4 1990 和 2010 年沂河流域土地利用状况

Fig.4 Land use/cover in 1990 and 2010 for Yihe river basin

降幅在 0.1—0.2℃之间。10 月所有的土地利用类型的温度均表现为上升态势,其中混交林和水体升温幅度最大,分别为 0.7℃和 0.3℃,其次是灌木林地,温度增幅在 0.2℃左右,而其他土地利用类型的温度增加幅度较小,小于 0.1℃。

2.3.2 降水变化

控制试验与敏感性试验模拟降水的差值结果表明(图 6),近 20 年的 LUCC 引起的 1 月和 4 月降水变化量很小,可以忽略不计;10 月降水略有增加,增量为 0.3mm;而 7 月由 LUCC 引起的平均降水减少幅度较大,降低了 23.7mm。可见,LUCC 对夏季降水影响较大,这是因为研究区夏季降水量相对丰富,LUCC 变化可以从一定程度上影响水汽通量的变化。

2.4 LUCC 的间接水文效应

基于 1960—2013 年研究区年径流和气象资料,利用公式(2)计算得到沂河流域年径流量对年降水变化的弹性系数为 2.4,意即研究区年降水量变化 1%,将引起年径流量变化 2.4%。而研究区年径流量对年均气温变化的弹性系数小于降水,为-1.8,这表明气温升高 1%,将导致径流减少 1.8%。这也说明研究区降水对径流的影响程度大于气温。

同时,基于公式(3)可以得出 1990—2010 年 LUCC 引起 2013 年降水和气温变化导致的沂河年径流量的变化率分别为 18.4%和 1.7%。可以看出,LUCC 的间接水文效应主要表现在对降水变化的影响。

3 讨论

WRF 模式模拟结果表明,近 20 年来研究区 LUCC 导致局地气候发生了明显变化,而且这种变化对径流量产生了重要影响。因此,LUCC 的水文效应不仅表现在改变地表植被的截留量、土壤水分的入渗能力等产流、汇流方面,而且体现在通过影响局地降水和蒸发等气象要素而间接影响径流。因此,LUCC 导致的间接水文效应值得进一步关注,这也是我们未来工作的重点。在研究方法上,可考虑基于气候模式与具有良好物理机制的水文模型耦合的方法,全面解析 LUCC 产生的气候和水文效应。

虽然 WRF 模式模拟结果通过了显著性检验,但本文仅模拟了各季节的代表性月份 LUCC 对局地气候的影响,这给模拟结果带来一定的不确定性,因此要加强更长时间尺度的模拟与研究,进一步准确揭示 LUCC 产

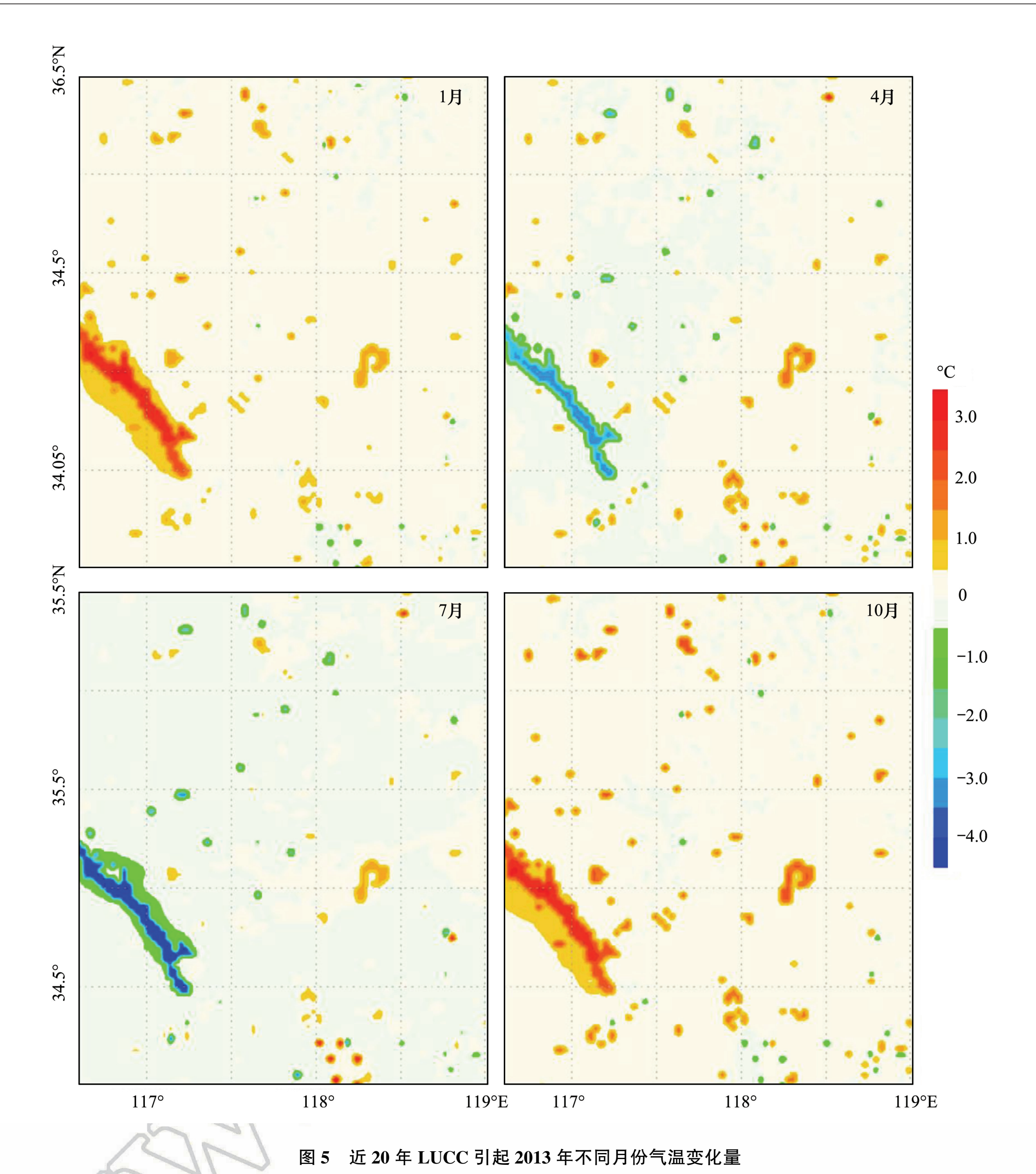


图 5　近 20 年 LUCC 引起 2013 年不同月份气温变化量

Fig.5　Temperature changes in January, April, July, and October due to the LUCC during the 20-year period

生的气候效应。同时,研究结果表明,不仅温度在区域平均的过程中会因正、负效应而相互抵消,而且降水也存在类似现象,这与前人研究结果一致[5,15]。因此,应从更高空间和时间分辨率角度科学揭示 LUCC 对局地气候的影响。

另外,模拟结果表明,1990—2010 土地利用类型变化使得研究区城市建设用地在个别月份的温度略有下降,可以有以下 3 个方面的探讨:一是尽管城市建设用地温度略降,但是 LUCC 导致的区域温度总体还是以升高为主,而城市建设用地仅是城市土地利用的一种类型,因此,至于 LUCC 是否导致研究区城市“热岛”整体减弱的还有待进一步研究;二是热岛效应不仅表现在强度上,也体现在空间分布上,虽然城市建设用地热岛减弱,但在空间上热岛范围在扩张;三是研究表明,在 2005 年以后我国东部许多地区的城市热岛出现减弱的趋势[22],例如葛荣凤等[23]研究发现北京二环区域的热环境呈现一定程度的好转,张晓莉等[24]指出 1987—2013 年西宁城区热岛强度小幅减弱,韩贵锋等[25]研究显示近 20 年来重庆部分城区的热岛强度明显减弱。这主要

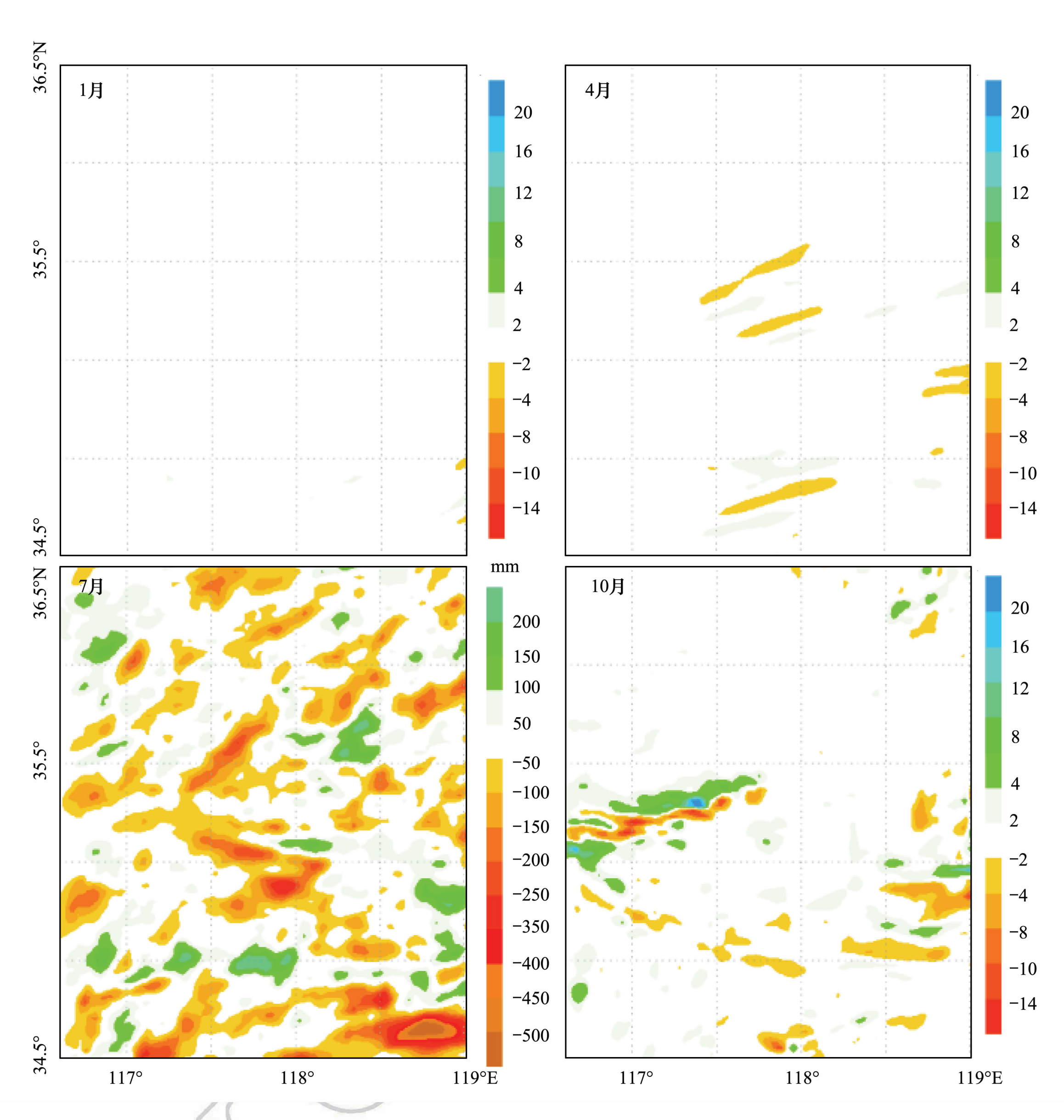


图 6 近 20 年 LUCC 引起 2013 年不同月份降水变化量

Fig.6 Precipitation variations in January, April, July, and October 2013 due to LUCCs during the 20-year period

是因为近年来我国城市空间格局优化、城市绿化面积增加等现象使得人为因素对城市环境的不利影响在减弱[22],人居环境改善[25]。因此,近 20 年来研究区 LUCC 导致城市建设用地温度在个别月份略有降低也是可以理解的。

4 结论

(1)1990—2010 年,研究区土地利用变化明显,主要是以旱地向建设用地($747.3km^2$)和裸地($132.4km^2$)转化的过程。

(2)近 20 年来,土地利用类型变化的区域气候效应明显且具有一定的时空差异性。WRF 模式模拟结果表明,LUCC 引起 2013 年 1 月和 10 月气温都增加了 0.2℃,使得 7 月气温却减小了 0.2℃,而 4 月气温基本稳定。其中,LUCC 导致混交林和水体的温度变化幅度较大,在 0.4—1.3℃之间,而对落叶阔叶林和湿地气温的影响较小,其温度变化幅度均小于 0.1℃。降水方面,1990—2010 年 LUCC 引起 1 月和 4 月的降水变化几乎可以忽略不计,导致 10 月降水增加了 0.3mm,而引起 7 月降水变化较大,即减少 23.7mm。

(3)1960—2013 年,沂河径流对流域气候要素变化响应敏感。流域降水和气温变化 1%,将会导致径流分别改变 2.4%和 1.8%。同时,1990—2010 年,LUCC 的间接水文效应显著,主要表现在 LUCC 使得 2013 年径流量减少了 20.1%。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis: Summary for Policymakers. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[2] Zhang X Z, Tang Q H, Zheng J Y, Ge Q S. Warming/cooling effects of cropland greenness changes during 1982-2006 in the North China Plain. Environmental Research Letters, 2013, 8(2): 024038.

[3] Pielke R Sr, Beven K, Brasseur G, Calvert J, Chahine M, Dickerson R R, Entekhabi D, Foufoula-Georgiou E, Gupta H, Gupta V, Krajewski W, Krider E P, Lau W K M, McDonnell J, Rossow W, Schaake J, Smith J, Sorooshian S, Wood E. Climate change: the need to consider human forcings besides greenhouse gases. EOS, Transactions American Geophysical Union, 2009, 90(45): 413-413.

[4] Pitman A J, Arneth A, Ganzeveld L. Regionalizing global climate models. International Journal of Climatology, 2012, 32(3): 321-337.

[5] 王明娜, 韩哲, 张庆云. 21 世纪初中国北方半干旱区土地利用变化对地表温度的影响. 气候与环境研究, 2016, 21(1): 65-77.

[6] 满文敏, 周天军, 张丽霞, 吴波, 张洁. 20 世纪温度变化中自然变率和人为因素的影响: 基于耦合气候模式的归因模拟. 地球物理学报, 2012, 55(2): 372-383.

[7] Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, Ciais P, Zhou L M, Li L Z X, Mynenif R B, Yin Y, Zeng H. Afforestation in China cools local land surface temperature. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(8): 2915-2919.

[8] 华文剑, 陈海山, 李兴. 中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1025-1036.

[9] 崔耀平, 刘纪远, 张学珍, 秦耀辰, 董金玮. 京津唐城市群土地利用变化的区域增温效应模拟. 生态学报, 2015, 35(4): 993-1003.

[10] Gao X J, Zhang D F, Chen Z X, Pal J S, Giorgi F. Land use effects on climate in China as simulated by a regional climate model. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(4): 620-628.

[11] Wang M N, Xiong Z, Yan X D. Modeling the climatic effects of the land use/cover change in eastern China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 87-88: 97-107.

[12] 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 樊江文, 邓祥征, 战金艳, 高学杰, 黄麟, 徐新良, 胡云峰, 王军邦, 匡文慧. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1015-1022.

[13] 邵璞, 曾晓东. 土地利用和土地覆盖变化对气候系统影响的研究进展. 气候与环境研究, 2012, 17(1): 103-111.

[14] Liu F S, Tao F L, Liu J Y, Zhang S, Xiao D P, Wang M, Zhang H, Bai H Z. Effects of land use/cover change on land surface energy partitioning and climate in Northeast China. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(1/2): 141-150

[15] 张学珍, 刘纪远, 熊喆, 张宏文. 20 世纪末中国中东部耕地扩张对表面气温影响的模拟. 地理学报, 2015, 70(9): 1423-1433.

[16] 董思言, 延晓冬, 熊喆, 石英, 王娟怀. 土地利用/覆盖变化对中国不同季节气温的影响. 生态学报, 2015, 35(14): 4871-4879.

[17] 陈海山, 李兴, 华文剑. 近 20 年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟. 大气科学, 2015, 39(2): 357-369.

[18] 董思言, 延晓冬, 熊喆. 东北农田扩张对气候影响的数值模拟. 气候与环境研究, 2014, 19(3): 351-361.

[19] 雷超桂, 许有鹏, 张倩玉, 王跃峰, 李广. 流域土地利用变化对不同重现期洪水的影响——以奉化江皎口水库流域为例. 生态学报, 2016, 36(16): 5017-5026.

[20] 袁宇志, 张正栋, 蒙金华. 基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响. 应用生态学报, 2015, 26(4): 989-998.

[21] Zheng H X, Zhang L, Zhu R R, Liu C M, Sato Y, Fukushima Y. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. Water Resources Research, 2009, 45(7): W00A19, doi: 10.1029/2007WR006665.

[22] 刘沁萍. 近 20 年来中国建成区扩张、建成区植被和热岛效应变化及其人文影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.

[23] 葛荣凤, 王京丽, 张力小, 田光进, 冯悦怡. 北京市城市化进程中热环境响应. 生态学报, 2016, 36(19): 6040-6049.

[24] 张晓莉, 赵鹏祥, 高凌寒, 赵选, 王辉. 基于 Landsat 影像的西宁市主城区热岛效应分析. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 183-190.

[25] 韩贵锋, 颜文涛, 赵珂, 叶林. 近 20 年来重庆市主城区地表热岛的时空变化. 环境科学研究, 2012, 25(6): 615-621.